

PILOTAGE D'UN VÉHICULE AUTONOME À L'AIDE DE RÉSEAUX DE NEURONES

Isabelle RIVALS

Laboratoire d'Électronique de l'ESPCI, 10 rue Vauquelin, 75231 Paris Cedex 05.

Tél: 01 40 79 45 45 ; Fax: 01 40 79 44 25 ; E-mail : Isabelle.Rivals@espci.fr.

Résumé :

Nous présentons ici la réalisation du module de pilotage d'un véhicule autonome tout-terrain à l'aide de réseaux de neurones. Nous montrons l'intérêt de ces derniers pour la modélisation non linéaire du comportement du véhicule, modélisation qui intègre avantageusement les connaissances *a priori* disponibles. L'efficacité des réseaux de neurones pour la commande optimale non linéaire est mise en évidence par la commande latérale du véhicule ; leur apport pour la commande robuste, nécessaire en tout-terrain, est illustré par le système de commande longitudinal, qui met en œuvre un modèle interne neuronal du véhicule.

Mots-clé :

Réseaux de neurones, véhicule autonome, asservissement sur trajectoire, commande optimale, commande avec modèle interne, connaissances *a priori*.

INTRODUCTION

Les réseaux de neurones formels, systèmes de traitement de l'information dont la structure s'inspire de celle du système nerveux, sont très vite apparus comme de bons candidats à la réalisation de machines destinées à effectuer des tâches auxquelles les ordinateurs et les outils traditionnels semblent moins bien adaptés que les êtres vivants, telles les tâches perceptives et motrices. Ainsi, l'un des grands domaines d'intervention des réseaux de neurones est-il celui de l'Automatique, où des avancées significatives tant du point de vue fondamental que du point de vue des applications industrielles se sont produites au cours des années 90, signe incontestable de la maturation de ces outils. Nous allons ainsi présenter la réalisation du système de pilotage automatique d'un robot mobile à l'aide de réseaux de neurones effectuée au cours de la préparation d'un Doctorat [1], dans le cadre d'une convention CIFRE dont le partenaire industriel était la société SAGEM.

LE PILOTAGE DE ROBOTS MOBILES

La conception de robots mobiles, et en particulier de véhicules automatisés à roues, est un domaine de recherche en pleine expansion, et qui présente des enjeux industriels considérables. Ces véhicules sont en effet abondamment utilisés dans l'industrie comme moyen de transport, d'inspection, ou d'opération, et sont particulièrement adaptés à des interventions en environnement hostile.

Problèmes posés par le pilotage de robots mobiles en tout-terrain

Les robots mobiles à roues ont fait l'objet de nombreux travaux : conception mécanique, systèmes de vision et de localisation, planification du déplacement, et pilotage proprement dit. L'élaboration de ce dernier pose en effet de grandes difficultés : un véhicule à roues est un système intrinsèquement non linéaire de par sa cinématique et ses caractéristiques dynamiques (actionneurs, moteur thermique) ; de plus, et particulièrement en tout-terrain, il peut être soumis à de nombreuses perturbations, tels que des changements d'adhérence du terrain ou de pente, des coups de vent, etc. Le pilotage d'un tel système doit donc nécessairement, pour être performant, prendre ces *non-linéarités* et ces *perturbations* en considération.

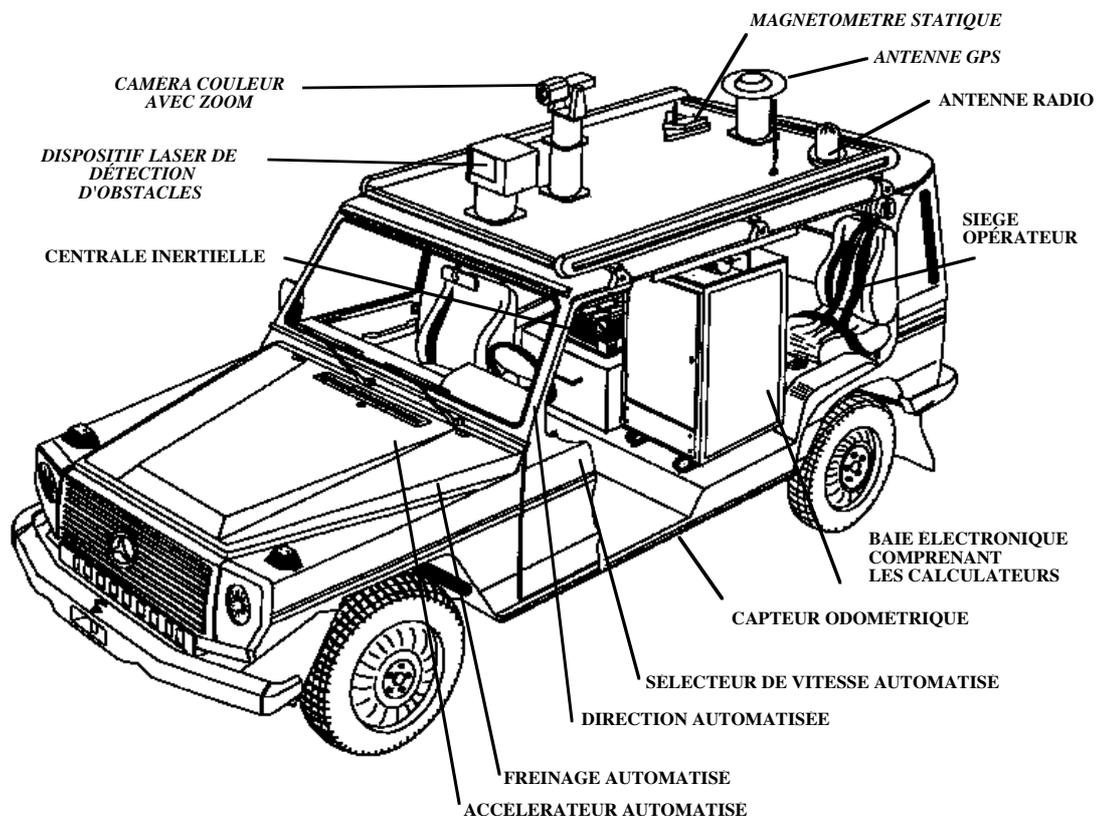


Figure 1 : Le véhicule autonome REMI.

Le véhicule autonome REMI de la SAGEM

Afin d'étudier les problèmes posés par le pilotage des robots mobiles, l'unité de recherche en Automatique de la Division Navigation et Défense de SAGEM a équipé REMI, un 4x4 Mercedes de série, des actionneurs nécessaires au pilotage, ainsi que de capteurs pour la localisation du robot et celle d'obstacles éventuels [2] (voir Figure 1).

Le robot REMI n'est pas destiné à être commercialisé, mais plutôt à poser les jalons d'applications industrielles futures, telles que l'automatisation de véhicules se déplaçant dans des forêts, des exploitations agricoles ou des chantiers de construction, de robots anti-incendie ou de déminage, afin d'éviter au maximum l'intervention humaine dans des tâches fastidieuses ou dangereuses. On peut également envisager la réalisation en série de certaines fonctions de pilotage sur les automobiles, comme les régulateurs de vitesse, de plus en plus répandus.

Définition de la tâche de pilotage

La tâche, ou mission du robot, définie au départ par un opérateur humain, consiste en une destination finale assortie de contraintes temporelles. À bord du robot se trouve un module de *planification* qui, en fonction de la position du robot, de son environnement et de sa mission, élabore une liste de points de passage assortis d'une vitesse moyenne. Cette liste est transmise à un module de *guidage* qui la transforme en une séquence de postures (positions et attitudes) et de vitesses de consigne. La fonction de *pilotage* consiste en l'élaboration des commandes des actionneurs de la direction (du volant) et de la vitesse (de l'accélérateur et des freins) de manière à respecter ces consignes.

Or, dans toutes les études précédemment effectuées par la SAGEM, le pilotage du véhicule était réalisé de façon classique, c'est-à-dire principalement à l'aide de techniques *linéaires* : le but de la collaboration avec le Laboratoire d'Électronique de l'ESPCI était l'évaluation des méthodes de modélisation et de commande *non linéaires neuronales* pour réaliser les lois de commande du pilotage (voir les correcteurs neuronaux représentés en Figure 2). Suivant une stratégie dite de "path following" [1], la tâche de pilotage peut être divisée en deux sous-tâches indépendantes concernant respectivement les comportements latéral et longitudinal du véhicule :

- le ralliement de la trajectoire de consigne, qui met en jeu l'actionneur du volant [3] ;
- le respect du profil de vitesse de consigne, qui met en jeu les actionneurs de l'accélérateur, des freins, et du sélecteur de vitesse [4].

Pour chacune de ces deux sous-tâches, la démarche neuronale consiste tout d'abord à modéliser les comportements du processus, respectivement latéral et longitudinal, à l'aide de réseaux de neurones bouclés. Le but est d'obtenir des modèles meilleurs que les modèles généraux répertoriés dans la littérature, car prenant en considération les non-linéarités et caractéristiques du robot particulier étudié (saturations, dynamique des actionneurs...). À

l'aide de ces modèles, on peut alors effectuer l'apprentissage de réseaux de neurones correcteurs afin que les comportements dynamique latéral et longitudinal du robot respectent le cahier des charges.

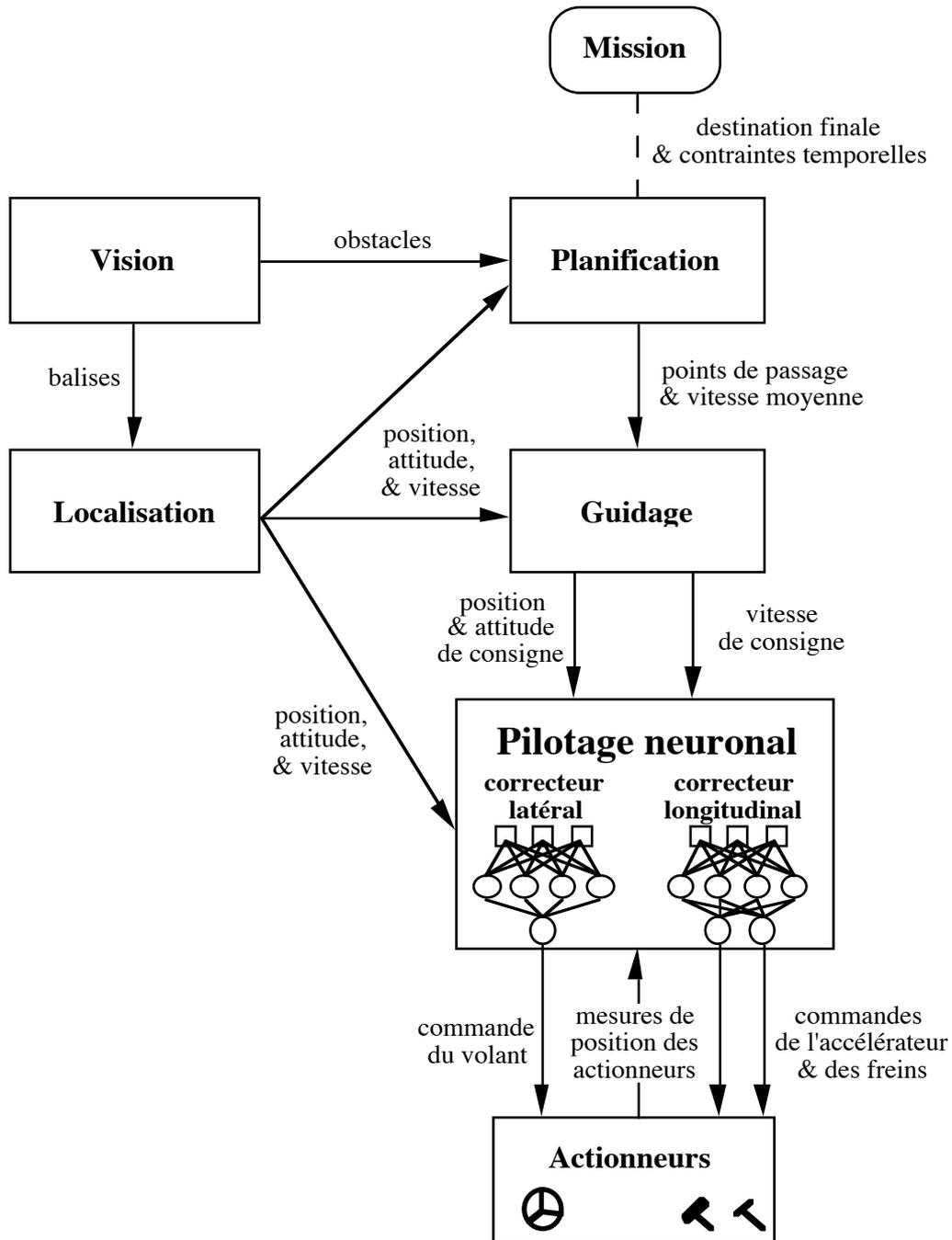


Figure 2 : L'architecture de mobilité du véhicule autonome REMI.

PILOTAGE LATÉRAL

L'entrée du modèle latéral est la commande de l'actionneur du volant (un moteur à courant continu sur la colonne de direction), et ses sorties sont la position et le cap, ou posture, du véhicule. À partir d'enregistrements entrée-sortie, nous avons obtenu un modèle neuronal qui a l'avantage sur son homologue classique, un simple modèle "bicyclette", de modéliser précisément le comportement dynamique de l'actionneur du volant, un moteur à courant continu sur la colonne de direction (qui présente des saturations en vitesse et en position angulaires), ainsi que la non-linéarité géométrique du mécanisme de direction. Notons que, contrairement à une idée largement répandue selon laquelle la modélisation neuronale ne permet de mettre au point que des modèles "boîte noire", c'est-à-dire dont les paramètres n'ont aucune signification physique, la démarche neuronale peut, comme les approches classiques, tirer profit de l'étude des phénomènes physiques mis en jeu, et incorporer ces connaissances dans les modèles (en mêlant aux neurones standards - à tangente hyperbolique - des "neurones" réalisant des fonctions déterminées, en fixant les valeurs de certains coefficients...) [5] [6] [7] ; nous avons de cette manière utilisé avec profit les modèles mathématiques disponibles, et intégré les saturations de l'actionneur.

Le but de la commande latérale est d'annuler les écarts de position et de cap du véhicule par rapport à la trajectoire de consigne. Nous avons exprimé ce problème comme celui de la régulation optimale de l'état du véhicule au sens d'un coût quadratique. La recherche *ab initio* d'une loi de commande optimale, étendue à des modèles non linéaires et à l'utilisation d'un correcteur neuronal, est une généralisation intéressante de la commande linéaire quadratique.

PILOTAGE LONGITUDINAL

Les entrées du modèle longitudinal sont la commande de l'actionneur du frein (une servovanne imposant la pression dans le circuit de freinage) et celle de l'actionneur de l'accélérateur (un moteur à courant continu sur le papillon des gaz), et sa sortie est la vitesse du véhicule. Nous avons élaboré un modèle longitudinal qui présente des performances analogues à celles des modèles classiques, mais offre l'avantage d'une plus grande simplicité et d'une compacité remarquable (les modèles latéraux et longitudinaux ne comportent que cinq neurones chacun).

Le problème de la poursuite de la consigne de vitesse s'est avéré délicat en raison de la moindre précision du modèle longitudinal du véhicule, et des nombreuses perturbations comme les changements de pente ou de terrain. Nous avons donc développé un système de commande neuronal avec modèle interne, afin de pallier les imperfections du modèle ainsi que l'effet des perturbations. Un tel système met en jeu le modèle neuronal utilisé pour

l'apprentissage du correcteur, et le principal signal de rétroaction est la différence entre la sortie du modèle interne et celle du processus. Cette différence est représentative des défauts de modélisation et de l'effet de perturbations, et sa prise en considération rend le système de commande *robuste* vis-à-vis de ces défauts et des perturbations [8]. Ce type de système de commande n'est pas particulier aux réseaux de neurones, mais l'utilisation de ces derniers permet d'améliorer considérablement les performances de la commande avec modèle interne dans le cas de modèles non linéaires du processus, le plus souvent nécessaires.

PERFORMANCES ET COMPARAISON AVEC LE SYSTÈME CLASSIQUE

Le module de pilotage neuronal a été testé à grande vitesse sur route (jusqu'à 72 km/h), ainsi qu'en tout-terrain sur des pistes d'essais de caractéristiques calibrées de l'ETAS (Établissement Technique d'Angers). Les trajets présentaient de fortes variations de courbure (courbure maximale de $0,1 \text{ m}^{-1}$), des pentes allant jusqu'à 40%, et des dévers maximaux de 30%, sur bitume et en tout-terrain. Les performances du système de commande du cap se sont révélées excellentes, avec une erreur latérale n'excédant jamais 40 cm. Le système de commande de la vitesse avec modèle interne garantit une erreur statique nulle, même en présence de perturbations importantes (pente de 40%), et un écart-type de l'erreur de l'ordre de 0.3 m/s en tout-terrain [1].

La supériorité du système neuronal sur son homologue classique est due principalement à la prise en considération des non-linéarités du véhicule *via* le modèle : celle de l'actionneur du volant (saturations en vitesse et en position angulaires) et du moteur thermique (aux grandes accélérations et ouvertures du papillon des gaz), et le système neuronal avec modèle interne est potentiellement mieux adapté au pilotage en tout-terrain, car plus robuste vis-à-vis des perturbations de terrain de par sa conception même. À l'instar des modèles, les correcteurs ne mettent en œuvre qu'une dizaine de neurones en tout, et ne posent aucun problème de portabilité (ils ont été implantés en langage C sur un processeur 68030).

CONCLUSION

La démarche neuronale présente l'avantage d'être indépendante de la complexité des modèles et, partant, des correcteurs à réaliser. Ceci reste vrai lorsqu'il est nécessaire d'envisager des architectures adaptatives (le correcteur est ajusté en permanence pendant son utilisation avec le processus), comme c'est le cas si le processus est non stationnaire. La facilité d'apprentissage et de mise en œuvre des réseaux de neurones est l'un de leurs atouts principaux pour la modélisation et la commande de processus dont la complexité provient de non-linéarités. De plus, la possibilité d'incorporer au système de commande un modèle interne neuronal offre de larges perspectives en matière de robustesse. Enfin, nous avons vu

que la conception des réseaux de neurones peut facilement intégrer les informations concernant le processus à commander prodiguées par les experts, démarche qui permet notamment d'augmenter encore leur compacité.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Rivals I. (1995) Modélisation et commande de processus par réseaux de neurones; application au pilotage d'un véhicule autonome, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI.
- [2] Van Den Bogaert T., Lemoine P., Vacherand F., Do S. (1993) "Obstacle avoidance in PANORAMA ESPRIT II project", Preprints of the 1st IFAC International Workshop on Intelligent Autonomous Vehicles, pp. 48-53.
- [3] Rivals I., Personnaz L., Dreyfus G., Canas D. (1993) "Real-time control of an autonomous vehicle : a neural network approach to the path following problem", Proceedings of the 5th International Conference on Neural Networks and their Applications (NeuroNîmes'93), pp. 219-229.
- [4] Rivals I., Canas D., Personnaz L., Dreyfus G. (1994) "Modeling and control of mobile robots and intelligent vehicles by neural networks", Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Vehicles, 24-26 octobre 1994, Paris, pp. 137-142.
- [5] Ploix J.-L., Dreyfus (1995) "Knowledge-based neural modeling: principles and industrial applications", International Conference on Artificial Neural networks ICANN'95.
- [6] Rivals I., Personnaz L., Dreyfus G., Ploix J.-L. (1995) "Modélisation, classification et commande par réseaux de neurones : principes fondamentaux, méthodologie de conception, et illustrations industrielles", in Récents progrès en génie des procédés 9, Lavoisier technique et documentation, Paris.
- [7] Constant L., Lagarrigues P., Dagues B., Rivals I., Personnaz L. (1998) "Neural modeling of an induction machine", 9th International Symposium on System-Modeling-Control (SMC'98), April 27-May 1 1998, Zakopane-Poland.
- [8] Rivals I., Personnaz L. (1996) "Internal model control using neural networks", *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, June 17-20 1996, Warsaw-Poland, pp. 109-114.

Les articles et la thèse de l'auteur sont disponibles en format postscript compressé à l'adresse Internet suivante : <http://www.neurones.espci.fr/~rivals/>